

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии PhD

по направлению подготовки:

8D071 – «Инженерия и инженерное дело», образовательной программе:

8D07102 – «Транспорт, транспортная техника и технологии»

ДЮСЕНБАЕВ ЕРМЕК ШУИНШИБЕКУЛЫ

Разработка конструкции и исследование работы модульного ультразвукового глушителя дизельного двигателя

Актуальность диссертационной работы. Диссертационная работа выполнена в рамках реализации государственной политики Республики Казахстан в области климатических изменений и устойчивого развития, предусмотренной Стратегией достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года (утверждённой Указом Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 года № 121 «Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года»). Диссертационное исследование также выполнено в рамках грантового проекта «Разработка методики расчёта режима работы, конструкции устройств и материалов для очистки выхлопных газов транспортной техники ультразвуковым и лазерным излучением» (Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP26197113), договор № 309/25-27 от 29.09.2025 г.).

Эксплуатация дизельных двигателей дорожно-строительной, карьерной и коммунальной техники сопровождается значительными выбросами вредных веществ, включая твёрдые частицы (PM), оксиды азота (NO_x), оксид углерода (CO) и углеводороды (HC). Несмотря на внедрение современных топливных систем и каталитических нейтрализаторов, проблема загрязнения атмосферного воздуха остаётся актуальной, особенно для специальной техники, работающей в тяжёлых условиях, при низких и переменных нагрузках и вне развитой городской инфраструктуры.

По данным национальных и международных климатических обзоров, транспортный сектор Республики Казахстан формирует порядка 8–11 % совокупных выбросов парниковых газов, при этом доминирующая доля приходится на дорожный транспорт с двигателями внутреннего сгорания. В 2023 году объём выбросов CO_2 от транспортного сектора составил около 24 млн тонн CO_2 -эквивалента, что свидетельствует о значительном вкладе дизельной техники, включая грузовой, дорожно-строительный и коммунальный транспорт. В условиях крупных городов и промышленных агломераций доля мобильных источников загрязнения превышает 50 %, а в периоды высокой транспортной нагрузки достигает 70–80 %.

Традиционные системы очистки выхлопных газов дизельных двигателей – сажевые фильтры (DPF), системы селективного каталитического восстановления (SCR) и рециркуляции отработавших газов (EGR)

характеризуются высокой стоимостью, чувствительностью к качеству топлива, сложностью обслуживания и сниженной эффективностью при низких температурах выхлопа, что ограничивает их применение на дорожно-строительной и коммунальной технике. В связи с этим особый научно-практический интерес представляют физические методы очистки выхлопных газов.

Анализ показал, что среди физических методов наибольший потенциал имеют ультразвуковые и лазерные технологии, отличающиеся отсутствием реагентов и фильтрующих элементов, компактностью и возможностью гибкой настройки параметров воздействия. Однако применение лазерных систем в выхлопной среде сопряжено с существенными инженерными и эксплуатационными ограничениями, связанными с высоким энергопотреблением, деградацией оптических элементов, сложностью обеспечения безопасности и надёжности. В результате ультразвуковой метод очистки выхлопных газов на этом этапе является наиболее рациональным, сочетая эффективность, конструктивную простоту и эксплуатационную надёжность, тогда как идея комбинированного применения ультразвука и лазера является перспективной и требует дальнейших исследований.

Существующие исследования и разработки в области ультразвукового воздействия на выхлопные газы показывают, что ультразвуковые системы преимущественно реализованы в горизонтальных компоновках глушителей, что ограничивает эффективность осаждения коагулированных частиц, приводит к неравномерности акустического поля и повышенному риску засорения тракта. Анализ условий эксплуатации тракторов, дорожно-строительной и специализированной техники показывает, что для этого класса машин предпочтительными являются вертикально ориентированные системы выпуска. Совпадение направления выхлопного потока с действием силы тяжести обеспечивает более эффективное осаждение укрупнённых частиц, а равномерное размещение ультразвуковых излучателей по высоте корпуса позволяет реализовать многоступенчатое акустическое воздействие и повысить степень улавливания более опасных твердых частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} .

Несмотря на очевидные преимущества вертикальных ультразвуковых глушителей, в настоящее время отсутствуют исследования, посвящённые разработке их конструкции, обоснованию влияния ультразвукового воздействия и экспериментальной оценке эффективности очистки выхлопных газов. В связи с этим разработка конструкции и исследование работы вертикального модульного ультразвукового глушителя является актуальной научно-технической задачей, направленной на снижение вредных выбросов транспортной и специальной техники.

Гипотезой исследования является предположение о возможности повышения эффективности очистки выхлопных газов дизельных двигателей за счёт применения вертикально ориентированного модульного ультразвукового глушителя при рациональном выборе мощности и пространственного размещения ультразвуковых излучателей

Целью диссертационного исследования является разработка конструкции вертикального модульного ультразвукового глушителя и обоснование его работы для повышения эффективности снижения дымности и осаждения мелкодисперсных частиц в выхлопных газах дизельных двигателей дорожно-строительной и специализированной техники.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие **задачи:**

- выполнен анализ конструкций дизельных двигателей и систем выпуска отработавших газов автотранспортной и дорожно-строительной техники;
- проведен анализ физических методов очистки выхлопного газа;
- исследована физика процесса воздействия ультразвука на газовую среду;
- определены основные параметры ультразвукового воздействия, влияющие на эффективность коагуляции частиц;
- разработана математическая модель движения и укрупнения частиц в вертикальном ультразвуковом глушителе;
- методами теории подобия и анализа размерностей получены критерии подобия, описывающие конструкцию и позволяющие установить условия эффективной работы модульного ультразвукового глушителя;
- изготовлен экспериментальный модульный ультразвуковой стенд с поэтапным включением излучателей;
- проведены экспериментальные исследования по установлению влияния числа, мощности и комбинации ультразвуковых излучателей на дымность, состав выхлопных газов и массу осаждающих частиц;
- выполнена обработка экспериментальных данных и анализ полученных результатов;
- проведено технико-экономическое обоснование внедрения ультразвукового глушителя для дорожно-строительной техники.

Объектом исследования является система очистки выхлопных газов дизельного двигателя спецтехники.

Предметом исследования являются процессы коагуляции и осаждения твёрдых частиц выхлопных газов под воздействием ультразвуковых колебаний в модульном глушителе.

Методы исследования В диссертационной работе использованы методы теоретического анализа, математического моделирования, планирования и обработки эксперимента, методы теории подобия и анализа размерностей.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- подтверждена возможность повышения эффективности очистки выхлопных газов дизельных двигателей за счёт применения вертикально ориентированного модульного ультразвукового глушителя при рациональном выборе мощности и пространственного размещения ультразвуковых излучателей;
- в рамках математического моделирования сформирована система уравнений, связывающая рост массы частиц с их динамикой движения в вертикальном ультразвуковом поле;

- установлены критерии подобия, описывающие конструкцию и работу модульного ультразвукового глушителя;
- подтверждена эффективность модульного включения ультразвуковых излучателей для интенсификации процессов коагуляции;
- экспериментальным путем получена регрессионная зависимость, описывающая изменение показателей дымности газа от числа оборотов двигателя, мощности ультразвуковых излучателей и расстояния между излучателями.

Научные положения, выносимые на защиту

- вертикальная компоновка модульного ультразвукового глушителя является конструктивно и физически обоснованной, поскольку обеспечивает более благоприятные условия для укрупнения и гравитационного осаждения частиц по сравнению с горизонтальными схемами;
- эффективность ультразвукового воздействия на выхлопной газ определяется совокупностью параметров ультразвукового воздействия, включая мощность и пространственное распределение акустического поля, а также числом и комбинацией одновременно работающих ультразвуковых излучателей.
- разработанная математическая модель движения и коагуляции частиц в вертикальном ультразвуковом глушителе адекватно описывает рост массы частиц с их динамикой движения в вертикальном ультразвуковом поле, что также было подтверждено экспериментально увеличением массы осевших частиц.
- разработанная система критериев подобия, позволяет определить параметры конструкции и работы модульного ультразвукового глушителя;
- модульно-комбинированное включение ультразвуковых излучателей позволяет сравнивать процесс ультразвукового воздействия на выхлопной газ, обеспечивая повышение эффективности коагуляции.
- применение вертикального модульного ультразвукового глушителя на дорожно-строительной технике обеспечивает не только экологический, но и экономический эффект, выражающийся в снижении платы за выбросы загрязняющих веществ и предотвращённом социально-экономическом ущербе от загрязнения атмосферного воздуха.

Автор защищает

- конструкцию модульного ультразвукового глушителя дизельного двигателя вертикального типа, предназначенного для очистки выхлопных газов за счёт коагуляции и осаждения твёрдых частиц.
- математическую модель движения и укрупнения частиц в вертикальном ультразвуковом глушителе.
- методику расчета критериев подобия, описывающая конструкцию и работу модульного ультразвукового глушителя;
- результаты экспериментальных исследований, подтверждающие влияние количества, мощности и комбинаций ультразвуковых излучателей на дымность, состав выхлопных газов и массу осевших частиц.

- результаты технико-экономического обоснования внедрения ультразвукового глушителя для дизельной дорожно-строительной техники, подтверждающие целесообразность его практического применения.

Достоверность полученных в диссертационной работе выводов подтверждается грамотной формулировкой исследовательских задач, использованием обоснованных и адекватных методов исследования, а также согласованностью экспериментальных результатов с аналитическими расчётами.

Ключевые положения диссертации отражены в опубликованных научных статьях и материалах конференций. Также получено свидетельство о государственной регистрации прав на объекты авторского права.

Структура диссертации выстроена последовательно, разделы логически связаны между собой и раскрывают ход исследования в единой методической линии. Все поставленные автором задачи решены в полном объёме, цель исследования достигнута. Научная новизна и практическая значимость работы полностью соответствуют теме, цели и задачам диссертации.

Личный вклад диссертанта заключается в следующем. Автором самостоятельно спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд ультразвукового глушителя, обеспечивающий возможность проведения экспериментальных исследований. Соискателем разработана методика проведения экспериментальных исследований, выполнен комплекс опытов при различных комбинациях работы ультразвуковых излучателей, обеспечено измерение и регистрация ключевых параметров, характеризующих степень очистки выхлопных газов.

Соискатель выполнил обработку экспериментальных данных, на основании которых выявлены эффективность влияния ультразвукового воздействия на дымность, состав газа и массы осевших частиц. Также разработал математическую модель, описывающую процесс движения частицы газа в вертикальном ультразвуковом глушителе.

Кроме того, автором проведён технико-экономический анализ предлагаемого решения, обоснована практическая целесообразность его внедрения, а также сформулированы рекомендации по конструктивному исполнению и условиям работы устройства.

Публикация и апробация работы. Основные положения диссертации опубликованы в двух статьях, входящих в базы данных Scopus и Web of Science, в двух статьях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, в двух свидетельствах о государственной регистрации прав на объекты авторского права, а также в трёх тезисах международных научно-практических конференций.

В статье «Optimization of Vertical Ultrasonic Attenuator Parameters for Reducing Exhaust Gas Smoke of Compression–Ignition Engines: Efficient Selection of Emitter Power, Number, and Spacing», опубликованная в журнале *Soft Acoustic Metamaterials: Advances in Geometry, Mechanism, and Responsiveness*.

<https://doi.org/10.3390/app15147870> вклад автора заключался в следующем: концептуализация исследования, разработка методики, программное обеспечение, валидация, формальный анализ, проведение исследований, обеспечение ресурсами, курирование данных, написание оригинального черновика статьи, рецензирование и редактирование текста, визуализация результатов, администрирование проекта, а также привлечение финансирования.

В статье «Theoretical and experimental study of diesel engine exhaust gas purification in a vertical ultrasonic muffler stand» опубликованная в журнале *Komunikacie communications, Scientific letters of the university of Žilina*. <https://doi.org/10.26552/com.C.2026.009> вклад автора заключается в разработке математической модели, проведении экспериментальных исследований, обработке данных, подготовке текста статьи, редакционной доработки материала, визуализации полученных результатов.

В статье «Comparison of the Efficiency of Cleaning the Exhaust Gas of Internal Combustion Engines of Cars with Ultrasonic Emitters», опубликованной в журнале «Труды университета» № 3 (92), 2023, раздел «Строительство. Транспорт», DOI: 10.52209/1609-1825_2023_3_284. Вклад автора заключался в следующем: было осуществлено участие в разработке методики и плана экспериментальных исследований, подготовке экспериментальной установки, выборе режимов работы ультразвуковых излучателей, а также в проведении и анализе результатов экспериментальных исследований, направленных на оценку эффективности очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания.

Статья «Дизельді қозғалтқыштың модульдік ультрадыбыстық бәсеңдеткішінің құрылымын әзірлеу және жұмысын зерттеу» опубликованная в журнале Университет Еңбектері №4 (101), 2025, раздел «Строительство. Транспорт» DOI 10.52209/2706-977X_2025_2_102 Вклад автора заключается в разработке конструкции и исследовании принципа действия модульного ультразвукового глушителя, предназначенного для снижения содержания вредных примесей в отработавших газах дизельных двигателей. В ходе экспериментов были проведены измерения изменения содержания кислорода и показателей дымности газа, по результатам которых установлено, что ультразвуковое воздействие способствует увеличению концентрации кислорода и снижению дымности. Полученные результаты позволили сделать обоснованный вывод об эффективности модульных ультразвуковых глушителей в снижении вредных выбросов дизельных двигателей.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 171 страницах машинописного текста, состоит из обозначений и сокращений, введения, 4 разделов и заключения, включает в себя 45 рисунка, 28 таблиц, список использованных источников из 110 наименований и 5 приложений.

Краткое содержание диссертации

Все разделы диссертации выполнены в методической последовательности и логически взаимосвязаны. Все задачи поставленные диссертантом решены,

цель исследования достигнута. Практическая значимость и научная новизна соответствует поставленной цели, задачам и названию диссертации.

Краткое содержание.

В первой главе обосновано влияние конструкции, режима работы и технического состояния дизельного двигателя на процессы сгорания топлива и формирование вредных выбросов. Установлено, что выхлопные газы дизельных двигателей представляют собой сложную токсичную смесь, требующую эффективных методов очистки для обеспечения экологической безопасности и соответствия современным нормативным требованиям. Проанализированы существующие системы снижения выбросов, выявлены их высокая стоимость и сложность обслуживания, что обосновывает целесообразность применения физических методов очистки. Рассмотрены физические методы воздействия на выхлопные газы, среди которых наибольший интерес представляют ультразвуковые и лазерные способы очистки. Установлено, что лазерное излучение обладает высоким потенциалом за счёт фототермического и фотохимического воздействия на газоаэрозольную среду, однако его применение в условиях выхлопного тракта ограничено высоким энергопотреблением, деградацией оптических элементов и сложностью обеспечения надёжности и безопасности. В связи с этим было установлено, что наиболее рациональным является применение ультразвукового метода очистки выхлопных газов, сочетающего эффективность, конструктивную простоту и эксплуатационную надёжность, в то время как комбинированное использование ультразвука и лазера рассматривается как перспективное направление, требующее дальнейших исследований. Обосновано применение вертикальных глушителей с интегрированными ультразвуковыми излучателями как наиболее эффективного решения для тракторов и специальной техники. На основе проведённого анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе установлено, что эффективность ультразвуковой очистки определяется совокупностью взаимосвязанных параметров ультразвукового воздействия и условий газового потока. Сформирована иерархия ключевых параметров и предложена схема их взаимного влияния, создающая основу для эффективного влияния ультразвука на процесс очистки газа. Разработана вертикальная математическая модель движения частиц в выхлопных газах, обеспечивающая более точное описание процессов коагуляции и осаждения, а также разработана методика расчета критериев подобия, описывающая конструкцию и условия эффективной работы предлагаемого модульного ультразвукового глушителя.

В третьей главе экспериментально подтверждена эффективность ультразвуковых колебаний для очистки выхлопных газов дизельных двигателей. Установлено, что вертикальная конструкция ультразвукового глушителя с модульным расположением излучателей обеспечивает усиление процессов коагуляции и осаждения сажевых частиц, что приводит к снижению дымности выхлопных газов на 30–35 % и стабилизации их газового состава.

Разработанная регрессионная модель с высоким коэффициентом детерминации достоверно описывает влияние основных параметров ультразвукового воздействия на дымность газа и позволяет определить его значения при разных значениях числа оборотов двигателя. Полученные результаты подтверждают практическую применимость и перспективность ультразвуковых технологий для экологической модернизации дизельных двигателей.

В четвёртой главе выполнена оценка эффективности ультразвукового глушителя и дано технико-экономическое обоснование целесообразности его внедрения в парк дорожно-строительной техники Казахстана. На примере автогрейдера Cat 12M3 с двигателем Caterpillar C9.3 ACERT показано, что применение ультразвукового глушителя обеспечивает снижение массы выбросов загрязняющих веществ, уменьшение дымности и расхода топлива, а также сокращение экологических платежей. Расчёты подтвердили положительный экономический эффект для предприятия и высокий социально-экономический эффект для общества, характеризующийся коэффициентом эффективности свыше 2 и сроком окупаемости менее одного года. Проанализированы затраты на изготовление ультразвукового глушителя, установлено, что его стоимость существенно ниже традиционных сажевых фильтров при сопоставимой экологической эффективности. Сформулированы технические требования к ультразвуковому глушителю, обеспечивающие надёжную, безопасную и энергоэффективную работу в условиях эксплуатации спецтехники. Рассмотрены конструктивные особенности вертикального ультразвукового глушителя, а также вопросы монтажа, технического обслуживания и ремонта, что подтверждает его практическую применимость и перспективность для промышленного внедрения.

Диссертация представляет новые, научно обоснованные результаты, направленные на решение важной прикладной задачи – разработку конструкции вертикального модульного ультразвукового глушителя и обоснование его работы, обеспечивающих повышение эффективности снижения дымности и увеличения осаждения мелкодисперсных частиц в выхлопных газах дизельных двигателей дорожно-строительной, специализированной техники. По результатам диссертационного исследования были получены следующие выводы:

- проведён анализ конструкции и режимов работы дизельных двигателей, в результате которого установлено, что традиционные системы очистки, применяемые в условиях дорожно-строительной и карьерной техники, имеют существенные эксплуатационные ограничения, такие как высокая стоимость, зависимость от температурных режимов, чувствительность к качеству топлива и реагентов, а также необходимость регенерации;

- проведён анализ физических методов очистки выхлопных газов, показавший, что наибольшим потенциалом обладают ультразвуковые и лазерные методы, не требующие применения реагентов и фильтрующих элементов. Установлено, что практическая реализация лазерных систем в

выхлопной среде дизельных двигателей сопряжена с существенными инженерными и эксплуатационными ограничениями, в связи с чем в качестве базового выбран ультразвуковой метод. При этом их комбинированное применение рассматривается как перспективное направление дальнейших исследований.

- выдвинута и подтверждена гипотеза о том, что вертикальная компоновка модульного ультразвукового глушителя создаёт наиболее благоприятные условия для реализации механизмов коагуляции и осаждения частиц по сравнению с горизонтальными схемами;

- исследована физика процесса воздействия ультразвука на газовую среду, в результате чего установлена иерархия параметров процесса, их взаимосвязь и возможность управления ими в условиях ультразвукового воздействия;

- в результате математического моделирования сформирована система уравнений, связывающая рост массы частиц с их динамикой движения в вертикальном ультразвуковом поле, которая позволила количественно описать процессы коагуляции и осаждения частиц;

- на основе применения теории подобия и анализа размерности получена система критериев подобия, характеризующих конструкцию и режимы работы вертикального модульного ультразвукового глушителя, а также разработана методика расчёта его конструктивных и режимных параметров;

- разработан экспериментальный вертикальный модульный ультразвуковой стенд с возможностью изменения количества и расположения излучателей;

- экспериментально доказано, что эффективность процесса ультразвукового воздействия на выхлопной газ зависит от мощности ультразвука и комбинации излучателей;

- получены регрессионные зависимости между числом оборотов двигателя, мощностью ультразвуковых излучателей, расстоянием между ними и показателем дымности выхлопных газов, что позволяет прогнозировать процесс ультразвукового воздействия при различных режимах работы двигателя;

- технико-экономический анализ показал, что внедрение ультразвукового глушителя снижает экологические платежи и эксплуатационные расходы, обеспечивая экономическую и социальную эффективность;

- совокупность теоретических, модельных, экспериментальных и экономических результатов подтверждает научную обоснованность разработанного вертикального модульного ультразвукового глушителя и его пригодность для практического применения в транспортной технике.